

Approved For Release STAT
2009/08/31 :
CIA-RDP88-00904R000100130

Dec

Approved For Release
2009/08/31 :
CIA-RDP88-00904R000100130



Вторая Международная конференция
Организации Объединенных Наций
по применению атомной энергии
в мирных целях

A/CONF/15/P/2307
US3R
ORIGINAL: RUSSIAN

Не подлежит оглашению до официального сообщения на Конференции

"ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ
И СВОЙСТВА УРАНА".

Сергеев Г.Я., Титова В.В., Николаева З.П.,
Каптельцев А.М., Колоснева Л.И.

В В Е Д Е Н И Е

Изделия из урана работают в атомных реакторах при повышенных температурах в условиях сложного напряженного состояния. Поэтому изучение структуры и свойств урана в связи с условиями эксплуатации в реакторах стоит в ряду центральных проблем атомной энергетики.

В литом состоянии или после пластической деформации в δ -области уран крупнозернист, сравнительно тверд и при этом имеет невысокую прочность (предел прочности порядка 30-35 кг/мм²) и малую пластичность (удлинение - 5%). Кроме того, α -уран обладает ярко выраженной анизотропией физических и механических свойств. Изделиям из урана свойственно формоизменение под воздействием облучения.

В связи с этим решение проблемы повышения срока службы изделий в реакторах связано с решением задачи изменения строения и свойств урана в нужном направлении.

Как известно, основными путями изменения строения и свойств чистых металлов являются: термическая обработка, деформация с последующим рекристаллизационным отжигом, легирование. Все эти методы обычно применяются и к урану.

25 YEAR RE-REVIEW

№ 2849

- 2 -

Ниже излагаются некоторые результаты исследования изменения структуры и механических свойств литого или горячекатаного урана путём термической обработки (закалки), а также путем деформации и отжига при температурах α - области.

І. СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОГО И ГОРЯЧЕКАТАНОГО УРАНА

Зерна литого или горячекатаного урана размером 1,5-2 мм состоят из субзерен размером 200-500 микрон (рис 4а). Отличие в кристаллографической ориентировке субзерен не превышает $5-10^\circ$.

Механические свойства урана различных плавок, определенные при кратковременных испытаниях на растяжение в диапазоне температур $20-850^\circ$, иллюстрирует рис 1. Испытывались стандартные цилиндрические образцы: диаметр рабочей части 5 мм; длина рабочей части 25 мм. Широкий диапазон изменения предела прочности и удлинения связан с колебанием содержания примесей в металле исследованных плавок.

С повышением температуры в α - области от 20° до 670° прочность падает при одновременном возрастании пластичности. Следует отметить неоднократно наблюдавшееся аномальное изменение характеристик прочности урана в температурном интервале $20-100^\circ\text{C}$. Значения предела прочности с изменением температуры от 20° до 100° увеличиваются, в то время как значения предела текучести уменьшаются.

С переходом в область температур β - фазы наблюдается возрастание предела прочности и уменьшение пластичности. С переходом в γ - область имеет место резкое падение прочности и возрастание пластичности.

При длительном пребывании в нейтронном поле изделия из урана испытывают деформацию под воздействием напряжений, возникающих благодаря наличию в них температурного градиента и вследствие образования термических пиков в результате актов деления.

2849-60

- 3 -

В связи с этим определенным интерес представляло исследование сопротивляемости урана ползучести в зависимости от состояния материала и условий испытания.

Ползучесть литого и горячекатаного урана была исследована в температурном диапазоне $20-600^{\circ}$ при различных напряжениях. Продолжительность испытаний соответствовала 700-1000 часам при повышенных температурах и до 6000 часов при комнатной температуре. При повышенных температурах ползучесть исследовалась в атмосфере очищенного гелия. Применялись стандартные цилиндрические образцы: диаметр рабочей части $10 \pm 0,05$ мм; длина рабочей части 100 мм.

В таблице I приведены результаты отдельных испытаний на ползучесть, а на рис 2 показана зависимость скорости ползучести горячекатаного урана от напряжений при температурах $20-600^{\circ}\text{C}$. Скорость ползучести урана резко возрастает с повышением температуры, особенно при температурах, превышающих 400° .

II. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УРАНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.

В наших исследованиях основным видом термической обработки урана являлась операция, условно называемая закалкой. Она осуществлялась путем нагрева металла до температур β - или

γ -фаз с последующим быстрым охлаждением в воде или масле. В этом случае термин "закалка" следует считать условным в связи с тем, что при такой термической обработке урана обычной чистоты не происходит фиксирования при комнатной температуре ни высокотемпературных, ни промежуточных фаз.

Однако закалка приводит к резкому изменению структуры и свойств урана.

Определялась зависимость механических свойств от условий закалки (температуры нагрева, скорости охлаждения), а также стабильность свойств закаленного металла при нагреве.

Таблица I.

Сопротивляемость урана ползучести в зависимости
от температуры и напряжений.

Темпера- тура испытания °C	Напряже- ние, σ кг/мм ²	Деформация в момент на- грузки ϵ_0 %	Скорость ползу- чести V %/ час	Интервал замера скорости ползучес- ти (час)	Суммарная дефор- мация ползучес- ти за		Примеча- ние:
					3а (час)	ϵ %	
20	25	0,70	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1100-3300	3300	1,12	Образец не разо- вался
100	20	0,88	$7,3 \cdot 10^{-5}$	560-1050	1050	1,28	"
200	18	0,49	$2,7 \cdot 10^{-5}$	360-820	820	0,63	"
300	18	0,58	$1,0 \cdot 10^{-4}$	200-815	815	0,81	"
400	10	0,15	$6,1 \cdot 10^{-4}$	300-735	735	0,70	"
500	3	0,05	$1,1 \cdot 10^{-3}$	275-750	750	1,05	"
600	1	0,02	$2,0 \cdot 10^{-3}$	25-150	850	3,15	"

- 5 -

I. Изменение механических свойств урана в зависимости от условий закалки.

Закалка с температур β -и γ - фаз приводит к резкому изменению структуры металла и значительному повышению прочностных характеристик, определенных как при кратковременных (рис 3), так и при длительных испытаниях в соответствующем диапазоне температур. Наибольшее изменение пределов прочности и текучести наблюдается после закалки из γ - области (примерно на 60% при комнатной температуре). Характеристики пластичности при этом изменяются мало.

Рис. 4 иллюстрирует изменение структуры урана при закалке. Наблюдается значительное измельчение зерна урана, причем степень измельчения зерна, так же как и прочностные характеристики закаленного урана, зависит от химического состава металла и соотношения примесей, в первую очередь таких, как железо, кремний, никель и алюминий (рис. 5 и 6).

Было установлено, что скорость охлаждения в процессе закалки оказывает существенное влияние на свойства закаленного металла. Рис. 7 иллюстрирует изменение свойств литого урана, закаленного из γ - области в воде, температура которой изменялась от 20° до 100°C.

Аналогично изменяются механические свойства и при закалке в различные охлаждающие среды. Так, горячекатаный уран, имевший предел прочности 38 кг/мм², после закалки с 950° (выдержка 30 минут) в воде показал значение предела прочности равное 64 кг/мм², после закалки в масле - 45 кг/мм² и после закалки в токе аргона - 40 кг/мм².

2. Изменение механических свойств закаленного урана при нагреве.

Для урана, закаленного из β - и γ - областей значения характеристик прочности с повышением температуры постепенно сни-

- 6 -

жаются, оставаясь, однако, при всех температурах α - области большими, чем те же характеристики при соответствующих температурах для незакаленного урана (рис 8).

Результаты испытаний закаленного урана на ползучесть позволили установить, что закалка из β - и γ -областей повышает сопротивляемость урана ползучести при температурах меньших 400° и уменьшает ее при более высоких температурах по сравнению с сопротивляемостью ползучести литого или горячекатаного металла (см. табл. 2).

На рис. 9 приведены первичные кривые ползучести, полученные при 300° (а) и 500° (б) для горячекатаного и закаленного из β - и γ -областей урана, а на рис. 10 показано изменение скорости ползучести в зависимости от напряжения при 500° для горячекатаного урана и урана той же плавки, закаленного из β - и γ -фаз.

При температурах, превышающих 300° , в процессе деформации урана значительную роль начинает играть течение по границам зерен. В связи с этим деформация мелкокристаллического закаленного металла с большой поверхностью границ протекает значительно легче, чем деформация крупнокристаллического литого или горячекатаного урана. При низких температурах, когда, как известно, деформация в основном осуществляется путем двойникования (I), упрочненный закалкой мелкокристаллический уран обладает значительно большей сопротивляемостью деформации.

Меньшая сопротивляемость ползучести при 400° закаленного урана по сравнению с незакаленным отмечена и в работе (2).

Было установлено, что закалка повышает на $30-40^{\circ}$ температурный интервал, в котором наблюдается резкое ускорение ползучести. Так, для горячекатаного урана область начала ускоренной ползучести находится в интервале температур $300-350^{\circ}$, а для закаленного - $350-375^{\circ}\text{C}$ (рис 18).

На рис. II приведен график изменения механических свойств закаленного урана в зависимости от температуры отпуска.

2849-60

2849-60

Таблица 2.

Получесть закаленного урана в зависимости от температуры испытания и напряжения.

Темпе- ратура испы- тания °C	Состояние; термическая сработка	Напря- жение кг/мм ² (G)	Дефор- мация в момент нагруже- ния %	Скорость ползу- чества %/час	Интервал замера скорости ползучес- ти (час)	Суммарная де- формация пол- зучести (час) %	Прине- чанье
I	2	3	4	5	6	7	8 9
	Горячека- танный	18	0,58	$1,0 \cdot 10^{-4}$	200-615	815	0,81 образец не разор- вался
300	Горячека- танный, зака- ленный из γ- области	18	0,08	$2,5 \cdot 10^{-5}$	90-800	800	0,17 "
		20	0,29	$3,5 \cdot 10^{-5}$	125-525	525	0,46 "
	Литой	20	2,00	$2,3 \cdot 10^{-4}$	235-475	500	2,83 "
	Литой, зака- ленный из γ- области	20	0,26	$6,0 \cdot 10^{-5}$	110-420	500	0,36 "

Прод. табл. 2.

I	2	3	4	5	6	7	8	9
	Горячекатаный	4	0,04	$3,5 \cdot 10^{-3}$	75-500	745	2,80	Образец не разорвался
500	Горячекатаный, закаленный из γ -области	4	0,08	$1,3 \cdot 10^{-2}$	50-175	735	$\delta = 26,7\%$	Образец разорвался
	Литой	4	0,04	$1,3 \cdot 10^{-3}$	40-520	520	0,87	Образец не разорвался
	Литой, закаленный из γ -области	4	0,05	$7,3 \cdot 10^{-3}$	40-340	520	4,92	"

1
∞
1

- 9 -

Закаленный уран сохраняет высокие значения пределов прочности и текучести после отпуска при температурах α - области и лишь после нагрева при температурах β - фазы наблюдается резкое падение значений характеристик прочности.

III. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УРАНА МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО ОТЖИГА ПРИ ТЕМПЕРАТУ- РАХ α - ОБЛАСТИ.

I. Изменение структуры урана в процессе дефор- мации и рекристаллизации.

В результате исследования микроструктуры деформированного и отожженного при температурах α - области урана были определены основные параметры рекристаллизации и построены приближенные диаграммы рекристаллизации для металла различной чистоты. Одна из таких диаграмм приведена на рис. 12. Она характеризует изменение величины рекристаллизованного зерна в зависимости от степени деформации и температуры отжига.

Температура начала рекристаллизации для урана соответствует $370-430^{\circ}$, температура полной рекристаллизации - $450-625^{\circ}$ (в зависимости от степени деформации). Критическая степень деформации меньше 5%. Интенсивная собирательная рекристаллизация наблюдается при $625-650^{\circ}$. Эти данные в основном согласуются с имеющимися литературными данными (3).

Путем деформации и отжига крупнокристаллическая структура литого или горячекатаного урана может быть превращена в мелко - кристаллическую с однородным по величине зерном размером 20-30 микрон (рис. 14).

Течение процессов рекристаллизации, как известно, сильно зависит от содержания в металле примесей и легирующих элементов. Имеются указания о существенном влиянии примесей на рекристаллизацию урана (3). Однако сколько - нибудь подробные сведения по

- 16 -

этому вопросу в литературе отсутствуют.

На рис. 13 представлена диаграмма рекристаллизации сплава урана с 0,1 вес % молибдена. Сравнение этой диаграммы с диаграммой рекристаллизации чистого урана свидетельствует о том, что указанное количество молибдена в значительной степени тормозит рекристаллизацию урана.

2. Механические свойства урана, подвергнутого деформации и отжигу при температурах α - области.

Графики рис. 15-а, б, иллюстрируют изменение механических свойств урана, определенных при кратковременных испытаниях на растяжение, в зависимости от степени деформации при прокатке.

Приведенные данные показывают, что с увеличением степени деформации значительно возрастают характеристики прочности. Так, предел прочности горячекатаного урана, служившего исходным материалом при прокатке, был равен 40,6 кг/мм², а прокатанного при 500° с обжатием 50%- 70,8 кг/мм², т.е. возрос на 74%. При этом характеристики пластичности почти не изменились.

Рекристаллизационный отжиг приводит к некоторому снижению характеристик прочности (рис 15б), однако, при всех рассмотренных степенях деформации, прочность рекристаллизованного металла существенно превышает прочность исходного горячекатаного металла.

На рис. 16 приведен характерный график "нагрузка - деформация", полученный в процессе растяжения при 20° плоского образца, вырезанного в направлении прокатки из рекристаллизованного уранового листа. Скачкообразное циклическое изменение нагрузки в процессе испытания является признаком так называемого "лавинного двойникования" и было отмечено для цинка и кадмия при комнатной температуре (4) и для меди при температуре 4,2° К (5). Приведенные данные наглядно свидетельствуют о том, что при комнатной температуре двойникование, как установлено Каном (1).

2849-60

- II -

является основным механизмом деформации урана. В процессе испытания таких образцов скачкообразное падение нагрузки сопровождалось потрескиванием и ярким искрением.

Пластическая деформация и рекристаллизация заметно влияют на сопротивляемость урана ползучести. Результаты испытаний, проведенных при 300° и различных напряжениях (таблица 3), показывают, что наибольшую скорость ползучести в условиях опыта имел мелкозернистый рекристаллизованный уран.

Так, например, при напряжении равном 22 кг/мм^2 скорость ползучести рекристаллизованного урана в 3-4 раза больше скорости ползучести урана, прокатанного при 500° с теми же степенями деформации и примерно в 5 раз больше, чем скорость ползучести исходного горячекатаного урана. При этом следует отметить большую деформацию рекристаллизованного урана в период неустановившейся ползучести (см. рис. 17).

Сопротивляемость ползучести рекристаллизованного урана зависит также от степени деформации при прокатке. Так, например, при 300° и напряжении 22 кг/мм^2 для урана, деформированного на 15% и 50% и рекристаллизованного при 600° в течение 2-х часов, скорости ползучести равны $4,2 \cdot 10^{-4}\%$ /час и $1,4 \cdot 10^{-3}\%$ /час, а остаточные деформации 1,55% и 3,05% соответственно. Рекристаллизованный уран имеет более низкую температуру начала ускоренной ползучести. Рассматривая зависимость суммарной деформации образцов за 500 часов испытания при напряжении 22 кг/мм^2 от температуры, можно видеть, что ускоренная ползучесть рекристаллизованного урана наблюдается с $225-275^{\circ}$, в то время как для горячекатаного урана эта область расположена в температурном интервале $300-350^{\circ}$, а для закаленного урана при еще более высоких температурах. Эти данные представлены графически на рис 18.

3. Анизотропия механических свойств рекристаллизованного урана.

Уран, в силу специфики строения кристаллической решетки α -фазы, обладает ярко выраженной анизотропией физических и

Таблица 3.

Влияние степени деформации при прокатке в α -области и напряжений, приложенных в процессе испытаний, на ползучесть урана (температура испытания 300°C).

Состояние; термическая обработка	Напря- жение 2 кг/мм ² (σ)	Деформа- ция в момент нагруже- ния $\epsilon, \%$	Скорость ползучести $V, \%$ /час	Интервал замера ско- рости пол- зучести (час)	Суммарная де- формация ползучести за (час) $\epsilon, \%$	Примеча- ние:	
I	2	3	4	5	6	7	8
Исходный го- рячекатаный уран	15	0,25	$3,6 \cdot 10^{-5}$	200-475	475	0,33	Образец
	18	0,45	$7,0 \cdot 10^{-5}$	100-475	475	0,59	не разор-
	22	1,19	$2,3 \cdot 10^{-4}$	100-455	460	1,72	вался.
Уран, прокатан- ный при 500 со степенью деформации равной 45%	15	0,12	$1,0 \cdot 10^{-4}$	100-500	500	0,30	"
	18	0,18	$1,4 \cdot 10^{-4}$	210-540	540	0,45	"
	22	0,20	$2,5 \cdot 10^{-4}$	100-540	540	0,55	"

2840-80

Прод. табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
То же + отжиг при 600° в течение 2-х часов	15 18 22	0,18 0,20 0,56	$9,7 \cdot 10^{-5}$ $5,1 \cdot 10^{-4}$ $1,9 \cdot 10^{-3}$	160-550 330-550 400-550	550 550 550	0,36 0,97 3,58	Образец не резавался "- " "-
Уран, про- катанный при 500° со степенем деформации равной 60%	15 18 22	0,15 0,19 0,22	$1,8 \cdot 10^{-4}$ $2,9 \cdot 10^{-4}$ $4,0 \cdot 10^{-4}$	200-475 200-500 200-460	475 500 500	0,95 0,57 0,67	"- "- "-
То же + отжиг при 600° в те- чение 2-х часов	15 18 22	0,18 0,24 0,54	$1,4 \cdot 10^{-4}$ $4,0 \cdot 10^{-4}$ $1,2 \cdot 10^{-3}$	220-455 200-455 320-455	460 460 460	0,47 0,79 3,00	"- " "-

- 14 -

механических свойств, которая особенно заметно проявляется после деформации в α - области, вследствие возникновения текстуры.

На рис.19 показано изменение предела прочности при растяжении для листового урана в зависимости от направления вырезки образцов. Образцы, вырезанные в направлении прокатки, имели на 30% больший предел прочности, чем образцы, вырезанные в перпендикулярном направлении. После рекристаллизационного отжига различие в значениях пределов прочности составляло 15%, т.е. такая термическая обработка не ликвидирует анизотропию механических свойств текстурированного урана

Характерно, что в случае деформации текстурированного урана методом осаживания, соотношение значений предела прочности в зависимости от направления вырезки образцов обратно тому, которое имеет место при деформации растяжением. В случае осаживания прочность образцов, вырезанных вдоль направления прокатки меньше, чем прочность образцов, вырезанных в перпендикулярном направлении.

Эти результаты могут быть связаны с представлениями Кана о существовании в уране направлений затрудненной деформации(I).

Как было отмечено выше, изделия из литого или горячекатаного урана, в силу специфики строения и свойств α - фазы, подвержены формоизменению под воздействием облучения и при циклической термической обработке. При наличии текстуры это формоизменение становится направленным.

Результаты исследований показали, что изменяя степень квазианизотропии изделий и механические свойства путем применения различных видов закалки, деформации и отжига при температурах α - области, можно в широком диапазоне регулировать формоизменение изделий из урана под действием указанных факторов.

2849-02

- 15 -

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закалка урана из областей β - и γ - фаз, приводит к измельчению зерна, повышает квазиизотропию изделий при одно - временном повышении предела прочности (до 60%).

Закалка урана в несколько раз увеличивает его сопротивляемость ползучести при температурах меньших 400° и уменьшает ее при более высоких температурах α - области.

Деформация, даже после последующего рекристаллизационно - го отжига в температурном диапазоне α - области, приводит к возникновению в уране текстуры, резкому измельчению зерна (при степенях деформации 30-40% и выше) и повышению прочности в области температур α - фазы.

Указанная обработка значительно снижает сопротивляемость урана ползучести при температурах, превышающих 300°.

Применение термической обработки (закалки) и деформации с последующим рекристаллизационным отжигом позволяет в широких пределах изменять структуру и механические свойства урана.

- 16 -

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Cahn R.W., "Plastic Deformation of Alpha-Uranium Twinning and Slip". Acta Met., 1, 149, (1953).
2. Nichols R.W., "Uranium and its Alloys". Nuclear Engineering, 2, (18) 355 (1957).
3. Foote Frank O., "Physical Metallurgy of Uranium".
Доклад № 555. Материалы Международной конференции 1955 г. по мирному использованию атомной энергии.
4. Борретт Ч.С., "Структура металлов". Металлургиядет 1948 г.
5. Blewitt T.H., Coltman R.R., and Redman J.K., "Low - Temperature Deformation of Copper Single Crystals".
Journal of Applied Physics, 28, (6) 651 (1957).

-17-

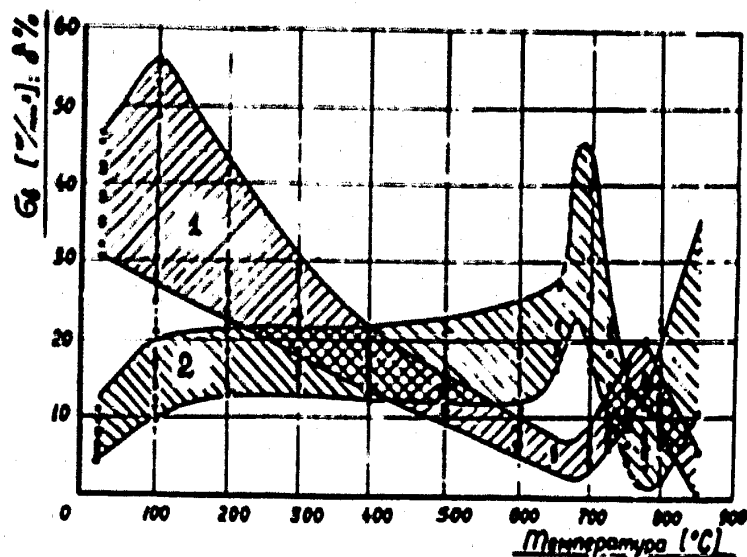


Рис I. Влияние температуры на механические свойства горячекатаного урана. Испытания проведены в атмосфере аргона. Содержание основных примесей в уране исследованных плавок:

$$\text{Fe} = 5 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-2} \%$$

$$\text{Si} = 2 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-2} \%$$

$$\text{C} = 0,01 + 0,15 \%$$

1 - предел прочности $[\sigma]$

2 - относительное удлинение. $[\delta]$

- 113 -

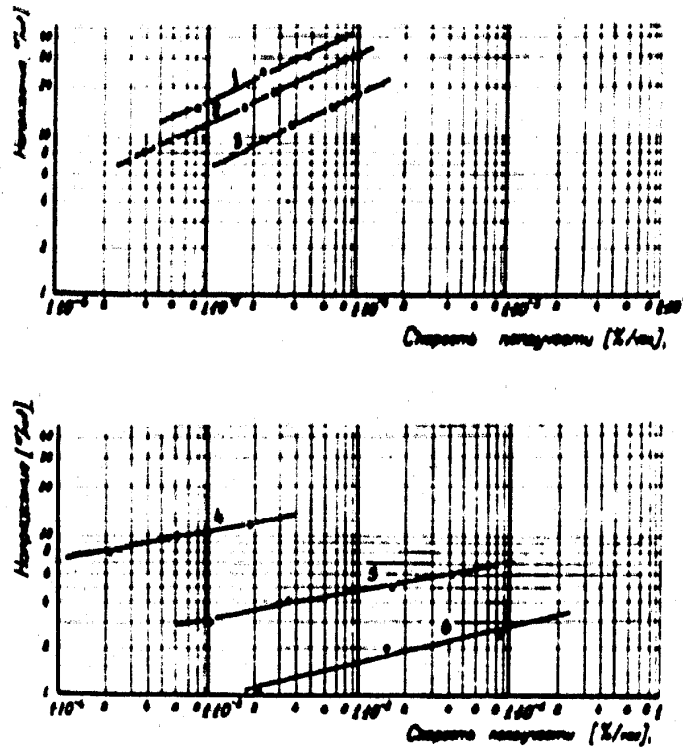


Рис 2. Изменение скорости ползучести горячекатаного урана в зависимости от температуры и напряжения.

Содержание основных примесей в уране: $Fe = 4,8 \cdot 10^{-3}\%$; $Si = 1,4 \cdot 10^{-3}\%$; $Ni = 1,8 \cdot 10^{-4}\%$; $C = 0,01\%$

1 - температура испытания	-	20°
2 - " "	-	200°
3 - " "	-	300°
4 - " "	-	400°
5 - " "	-	500°
6 - " "	-	600°

0144-60

-10-

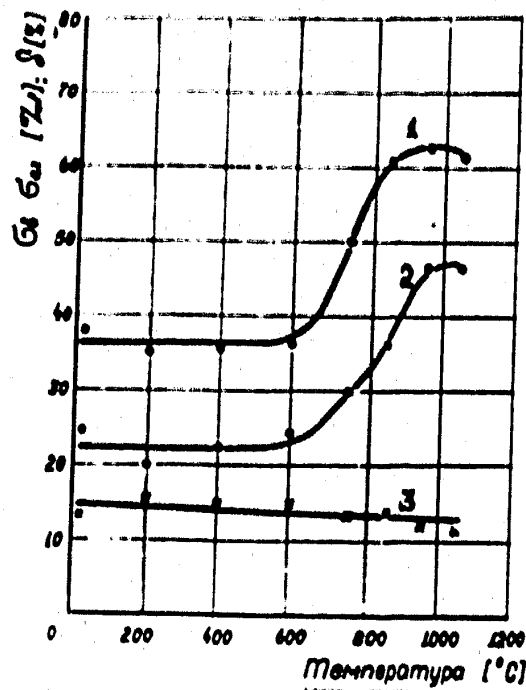


Рис 3. Изменение механических свойств горячекатаного урана в зависимости от температуры закалки. Продолжительность выдержки перед закалкой - 80 минут; охлаждение в масле.

Содержание основных примесей в уране:

$$\text{Fe} = 7 \cdot 10^{-8} \% ;$$

$$\text{Si} = 1,2 \cdot 10^{-8} \% ;$$

$$\text{C} = 0,04\%$$

1 - предел прочности - σ_b [%]

2 - условный предел текучести - $\sigma_{0.2}$ [%]

3 - относительное удлинение - δ [%]

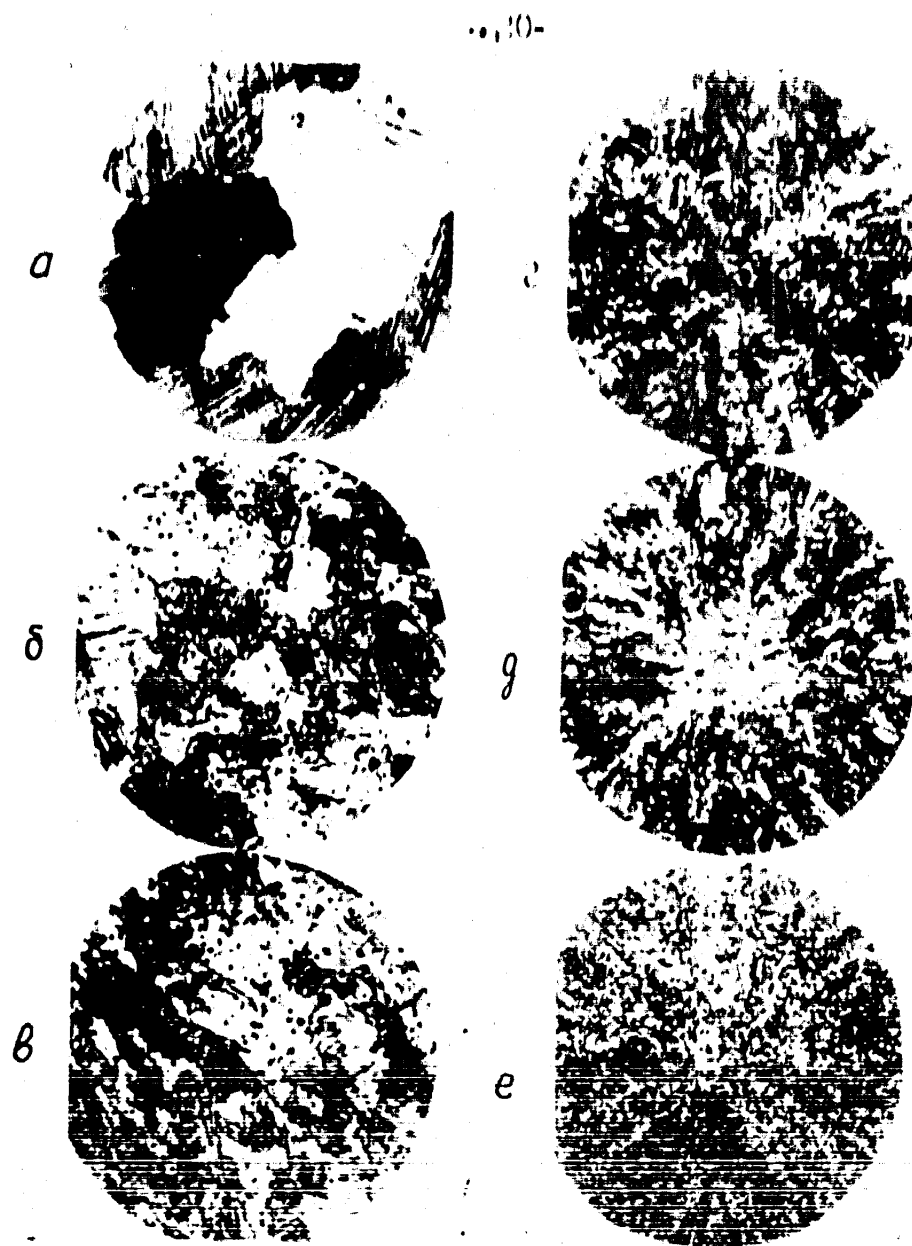


Рис - 4. Изменение структуры урана при закалке.

а- микроструктура литого урана. Суммарное содержание железа, кремния и алюминия $1,5 \cdot 10^{-2}\%$
x 70.

б- микроструктура закаленного из γ -фазы урана. Суммарное содержание железа, кремния и алюминия $5 \cdot 10^{-2}\%$ x 135.

в- микроструктура закаленного из γ -фазы урана. Суммарное содержание железа, кремния и алюминия $1 \cdot 10^{-1}\%$ x 135

г; д; е - микроструктуры образцов а, б и в соответственно x 2.

2849-60

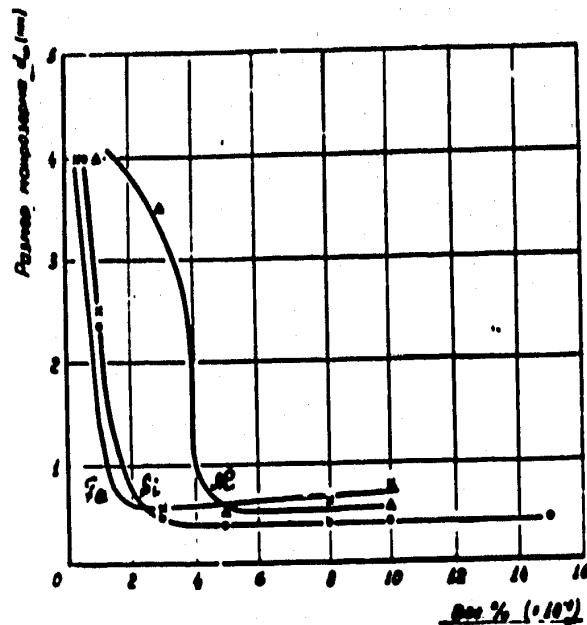
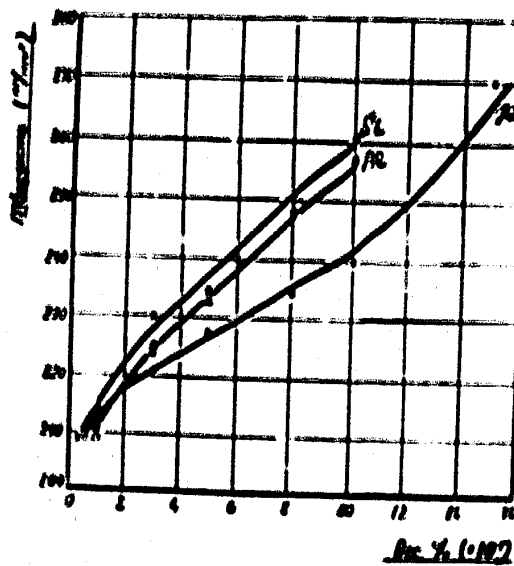
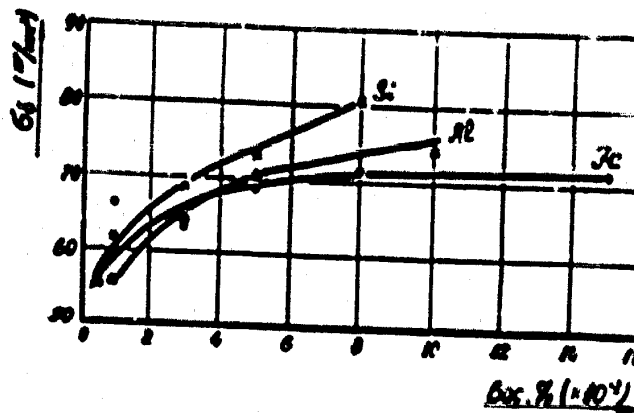


Рис 5. Влияние содержания железа, кремния и алюминия в уране на величину макрозерна.

0



8



6

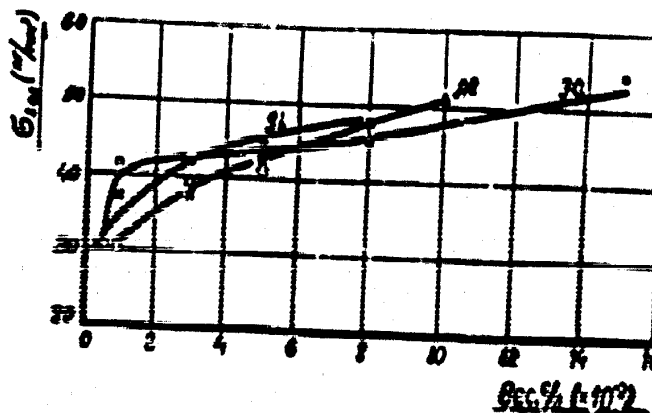


Рис 6.

Влияние содержания железа, кремния и алюминия в уране на твердость (H), предел прочности (σ) и предел текучести (σ_t). Температура испытания 20°C.

0149-6c

-23-

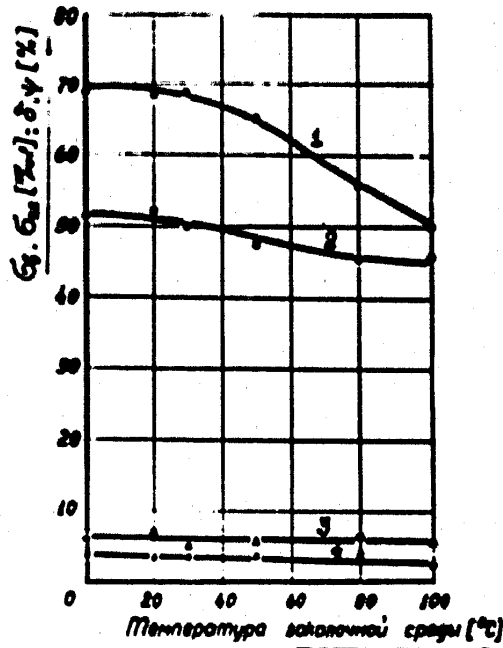


Рис 7. Влияние температуры закалочной среды на механические свойства литого урана, закаленного с 850° в воду.

(Выдержка 30 минут)

- 1- предел прочности - σ [$\text{кг}/\text{мм}^2$]
 2- условный предел текучести - $\sigma_{0.2}$ [$\text{кг}/\text{мм}^2$]
 3- относительное удлинение - δ [%]
 4- относительное сужение площади поперечного сечения - ψ [%]

-24-

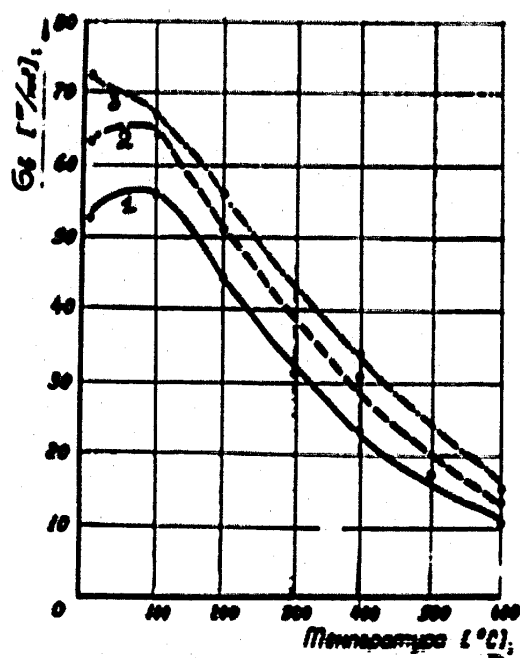


Рис 8. Изменение предела прочности литого и закаленного урана в зависимости от температуры испытания (металл одной плавки).

- 1- уран литой
 2- уран, закаленный из β -фазы
 3- уран, закаленный из γ -фазы

2849-60

-25-

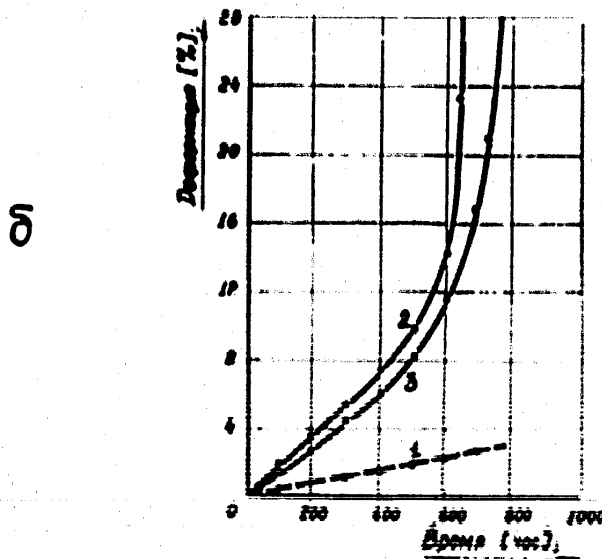
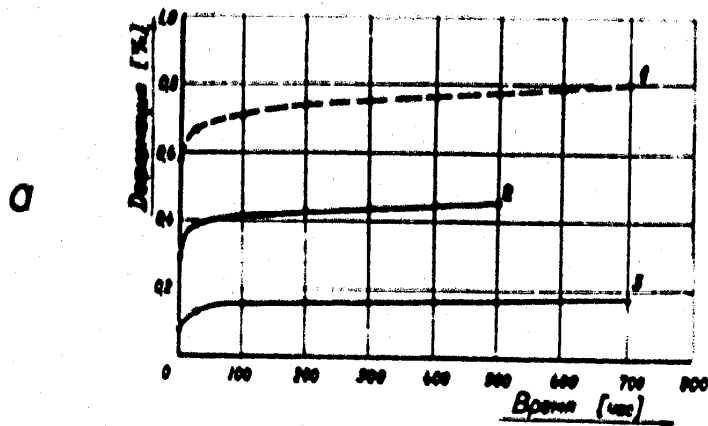


Рис 9. Первичные кривые ползучести для горячекатаного и горячекатаного закаленного урана:

а) Температура испытания 300°

1- уран горячекатаный $\sigma = 18 \text{ кг/мм}^2$

2- уран, закаленный из β -фазы $\sigma = 20 \text{ кг/мм}^2$

3- уран, закаленный из γ -фазы $\sigma = 18 \text{ кг/мм}^2$

б) Температура испытания 500°

1- уран горячекатаный $\sigma = 18 \text{ кг/мм}^2$

2- уран, закаленный из β -фазы

3- уран, закаленный из γ -фазы

-26-

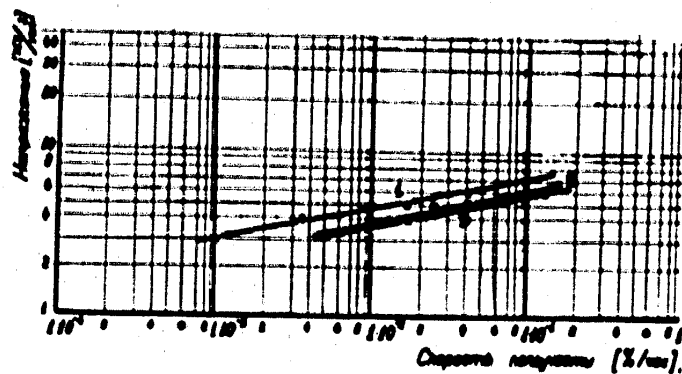


Рис 10. Изменение скорости ползучести для горячекатаного и горячекатаного закаленного урана.

Содержание примесей: $Fe = 4,8 \cdot 10^{-3}\%$;
 $Si = 1,4 \cdot 10^{-3}\%$; $C = 0,01\%$

1- уран горячекатаный

2- уран, закаленный из β - фазы

3- уран, закаленный из γ - фазы

-27-

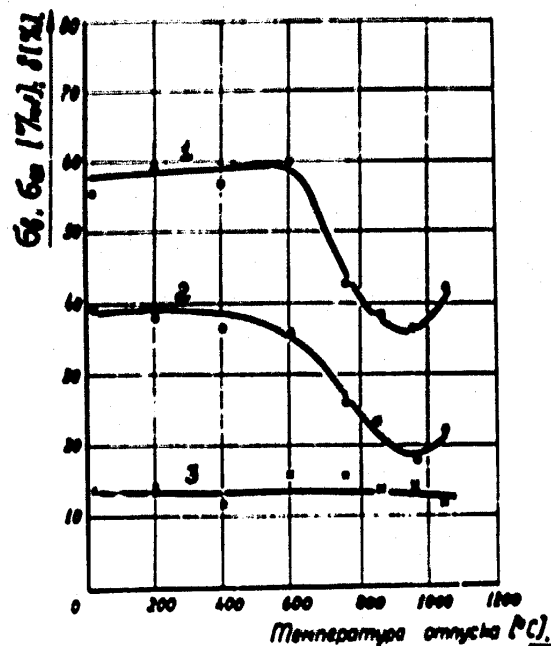


Рис II. Изменение механических свойств урана, закаленного из γ -фазы в зависимости от температуры отпуска.

(Нагрев до 850°; выдержка 30 мин; охлаждение в масле; отпуск при указанных температурах в течение 30 минут.

Испытания проведены при 20°)

- 1- предел прочности - $\sigma_{\text{т}}$ [кг/мм^2]
 2- условный предел текучести - $\sigma_{0.02}$ [кг/мм^2]
 3- относительное удлинение - δ [%]

-26-

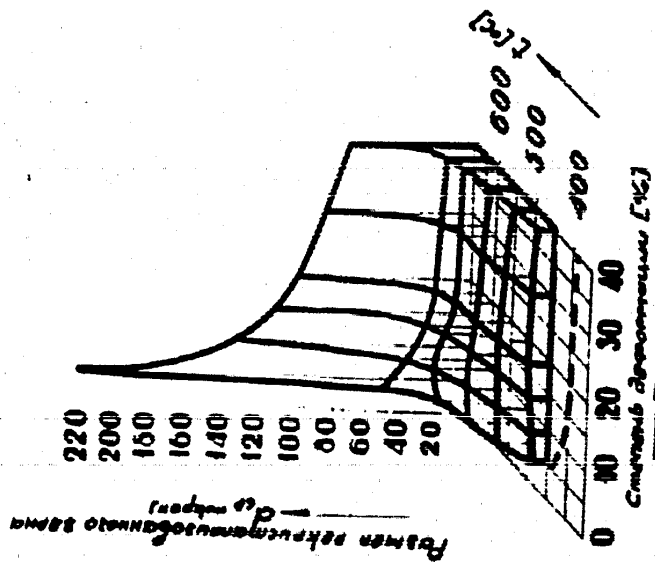


Рис 12. Приближенная диаграмма рекристаллизации урана. (Горячекатаный уран, деформация путем прокатки при комнатной температуре; продолжительность отжига после прокатки - 10 часов).

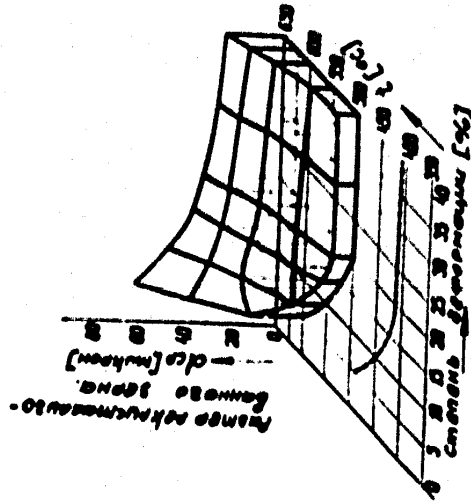


Рис 13. Приближенная диаграмма рекристаллизации сплава урана с $0,1\% \text{ молибдена}$. (Обработка та же, что и для металла рис 12.).

Пунктирная кривая соответствует порогу рекристаллизации, определенному методом рентгенографического анализа

2849-60

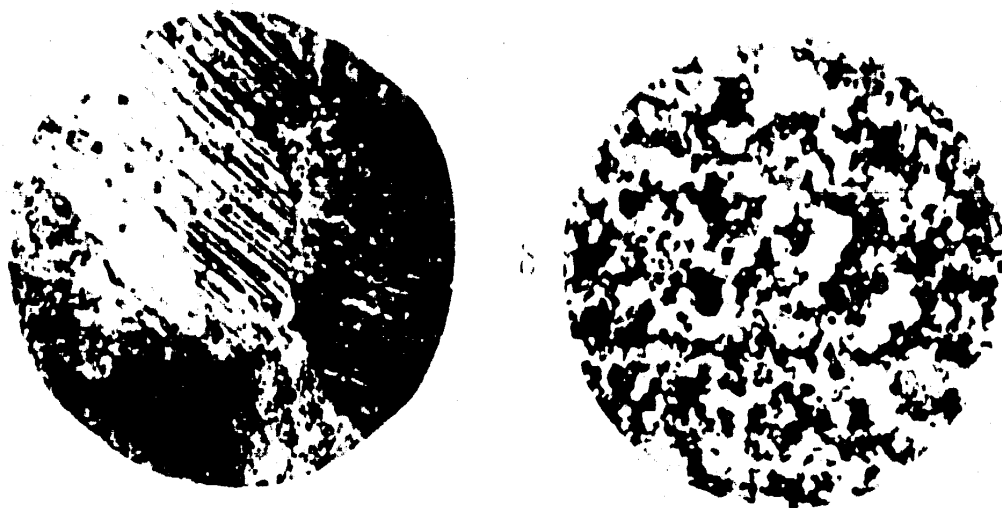


Рис I4. Изменение структуры урана после деформации и отжига при температурах α -области:

- а) исходный горячекатаный уран $\times 70$
 б) уран, прокатанный при 400°
 со степенью деформации 60% и отожженный при 600° в течение 2-х часов $\times 200$

2849-60

-3(-

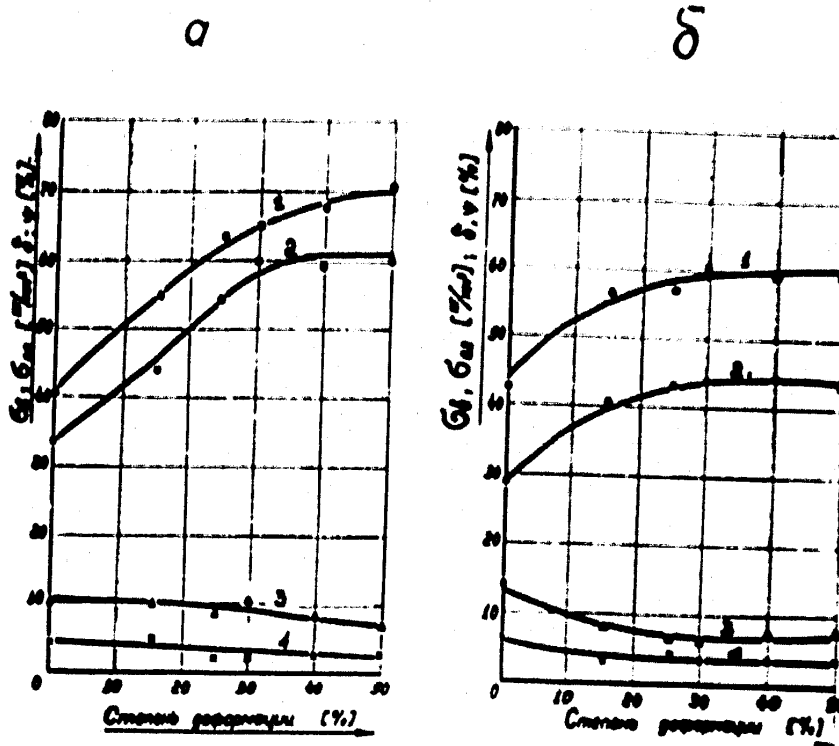


Рис 15. Изменение механических свойств урана в зависимости от степени деформации при прокатке. (Уран прокатан при 500° ; образцы вырезаны из прутков в направлении прокатки).

а) без отжига

б) после отжига при 600° в течение 2-х часов

1- предел прочности - σ_s [кг/мм^2]

2- условный предел текучести - $\sigma_{0.2}$ [кг/мм^2]

3- относительное удлинение - δ [%]

4- относительное сужение площади поперечного сечения - ψ [%]

-31-

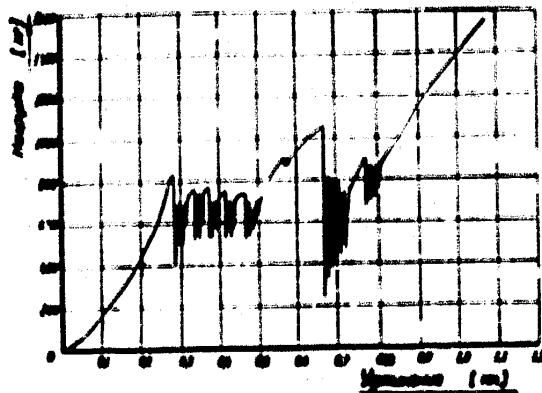


Рис I6. Кривая "нагрузка-деформация" для литового рекристаллизованного урана.

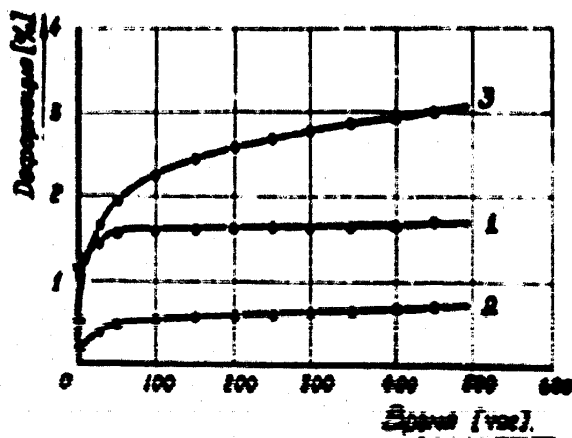


Рис I7. Влияние режима обработки в α -области на сопротивляемость урана ползучести при 800° $\dot{\epsilon} = 22 \frac{1}{\text{мин}}$
 1-й уран горячекатаный
 2-й уран, прокатанный в α -области со степенью деформации 60%
 3-й уран, прокатанный в α -области со степенью деформации 60% и отожженный при 600° в течение 2-х часов

-37-

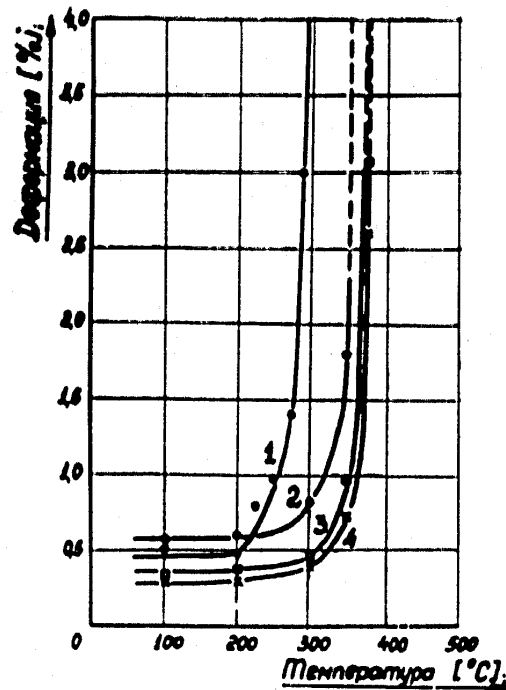


Рис 16. Изменение температурного интервала начала ускоренной ползучести урана в зависимости от состояния. (Деформация за 500 часов испытания при напряжении равном 22 кг/мм^2).

- 1- рекристаллизованный уран
- 2- горячекатаный уран
- 3- уран, закаленный в воду из β -области
- 4- уран, закаленный в воду из γ -области.

2849-60

53

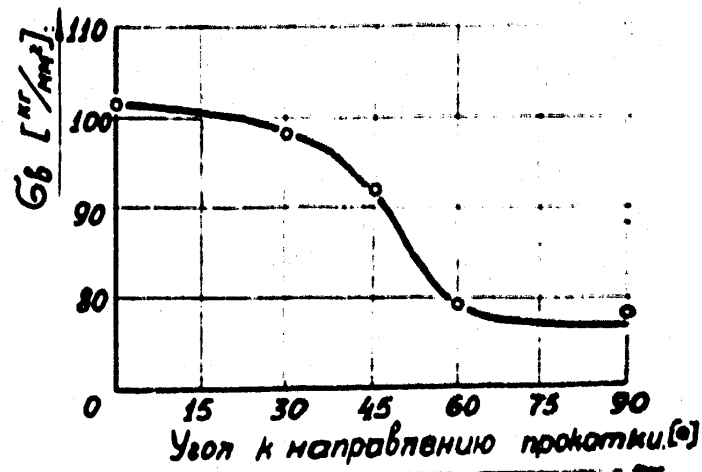


Рис I9. Изменение предела прочности при растяжении листового текстурированного урана в зависимости от направления вырезки образцов. (Прокатка при 200° со степенью деформации 60%; рекристаллизационный отжиг при 600° - 2 ч).